

令和 6 年 6 月 25 日現在

機関番号：12101

研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化(A））

研究期間：2019～2023

課題番号：18KK0378

研究課題名（和文）津波による時系列堆積・侵食過程のメカニズム解明と定量的モデルの構築

研究課題名（英文）Quantitative understanding of time-series sedimentation and erosion processes by tsunamis.

研究代表者

山口 直文（Yamaguchi, Naofumi）

茨城大学・地球・地域環境共創機構・講師

研究者番号：80634120

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 7,300,000円

渡航期間： 9ヶ月

研究成果の概要（和文）：本研究課題では、非定常流である津波流による堆積侵食過程について、定性的な理解を進展させ、現象のメカニズムの解明と定量的な理解を目指し、堆積過程の物理や、底質に含まれる泥質堆積物の影響についての研究に精通した英国 Hull大学の研究者らと連携して共同研究を実施した。特に流れの非定常性を考慮した土砂輸送モデルの検証や非定常流下の底質輸送における泥質堆積物成分の影響などについて明らかにするための水路実験とその解析を行った。その結果、流れの非定常性の影響が見られる範囲や砂泥混合物の場合の影響を定量的に評価することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究によって、これまで津波による堆積侵食シミュレーションなどに用いられてきた準定常流に基づいたモデルの妥当性が定量的に確認された。一方で、津波堆積物の堆積構造形成過程における非定常性の影響の可能性は残されており、今後その検討の重要性が見出された。また津波に限らず非定常流下における砂泥混合物輸送の複雑性が明らかになった。特に泥の特徴や割合の影響の大きさが定量的に示され、流れによる底質の巻き上げのシミュレーションなどにおいて無視できないことが明らかになった。

研究成果の概要（英文）：To develop a qualitative understanding of the sedimentary erosion process by unsteady tsunami currents and to elucidate and quantitatively understand the mechanisms of the phenomenon, a project was carried out in collaboration with researchers at the University of Hull, UK, who are familiar with the physical mechanisms of sedimentation processes and the effects of muddy sediments in the bottom material. In particular, hydrographic experiments and analyses were conducted to validate a sediment transport model that takes into account the unsteadiness of the flow and to clarify the influence of the muddy sediment component on sediment transport under unsteady flow. As a result, we were able to quantitatively evaluate the extent of the influence of unsteady flow and the influence in the case of sand and mud mixtures.

研究分野：地質学

キーワード：津波堆積物 堆積過程 水路実験

## 1. 研究開始当初の背景

津波は沿岸地域に甚大な被害を及ぼす大規模災害である一方で、低頻度な自然現象であるため、過去の発生間隔やその水理条件を直接的な観測に基づいて明らかにすることは難しい。このため、過去の津波の情報を記録している可能性のある津波堆積物は、沿岸地域の防災リスクを評価する上でも貴重な手がかりとなる。地層に残された津波堆積物には、その発生時期だけでなく、津波の規模に関連する陸上での津波流の浸水深や流速といった水理条件など、より定量的な情報が得られる可能性がある。地層に残された津波堆積物を正確に識別し、こうした津波の情報を引き出すには、その特徴や堆積過程の詳細な理解が必要となる。津波堆積物の特徴については、特に2011年東北地方太平洋沖地震にともなう津波の浸水を受けた地域における詳細な調査により、空間的な多様性や水理条件との関係についての数多くの報告がなされ、津波堆積物の識別や解釈をより正確に行うための重要な知見が蓄積された。

このような津波堆積物の調査によってその特徴の多様性が明らかになる一方で、それらから形成時の水理条件などを解釈できたのは、堆積構造や粒度の鉛直方向の変化が明瞭な場合など、ごく限られた条件の場合のみであり、それらの手法の多くも現実的ではない仮定を必要とするなどの問題を抱えている。それは、津波堆積物の解釈に必要となる、津波による詳細な堆積過程や、堆積物の特徴と水理条件との関係についての理解がまだ立ち遅れていることによる。特に、津波による流れの非定常性がどのように堆積・侵食作用に影響するかについての定量的な評価はいまだ十分にはなされていない。このためこれまでは河川流のような準定常流を仮定して、堆積物の特徴を解釈し堆積侵食過程を推定してきた。こうした状況に対し、基課題研究（若手研究B「津波による堆積・侵食過程の時系列解析:水理条件の復元に向けた水路実験」、課題番号16K17817）を含む研究代表者らのこれまでの研究によって、津波堆積物の特徴が、地形条件、水理条件および堆積物粒度条件に依存した時系列堆積侵食過程から大きく影響を受ける可能性が明らかになっており（Yamaguchi and Sekiguchi, 2015, 2018; 山口, 2019; Shinozaki et al., 2020）、より定量的な理解のための水路実験などによる解析が求められていた。

## 2. 研究の目的

本研究課題では、非定常流である津波流による堆積侵食過程について、定性的な理解を進展させ、現象のメカニズムの解明と定量的な理解を目指し、堆積過程の物理や、底質に含まれる泥質堆積物の影響についての研究に精通した英国 Hull 大学の研究者らと連携して共同研究を実施した。特に下記の3点について実施した。

## (1) 流れの非定常性を考慮した土砂輸送モデルの検証

基課題研究（若手研究B）において、津波のような非定常な流れのもとでの堆積物の巻き上げのタイミングが、水深に依存した流れの乱れの影響を受けることが示唆された。こうした堆積物巻き上げプロセスの初期水深への依存が、実際に運ばれる堆積物量に影響するかについてはこれまで明らかになっていない。またその非定常性を含む津波流による堆積物運搬メカニズムについて、特に陸上河川や混濁流との違いについては明らかになっていない。そこでこの研究では、初期水深や津波流の水理条件を変化させた水路実験によって実際に輸送された堆積物量を測定し、流速の時系列データから堆積物輸送モデルによって推算される量との比較を行った。

## (2) 非定常流下の底質輸送における泥質堆積物成分の影響

流れによる底質の輸送において、その底質に泥質堆積物が含まれることで輸送が妨げられる場合がある。また、研究代表者らの先行研究により、津波堆積物形成において細粒堆積物の挙動の重要性が示唆されている（Shinozaki et al., 2020）。一方向定常流においては、その影響について水路実験でこの10数年で多くの研究がなされているが、非定常流下での研究は少なく、Hull大学の研究グループによる水路実験（Wu et al., 2018, 2022）があるにとどまる。その数少ない実験も底質の含泥率に注目したものであり、水理条件が少ないため流れの非定常性の影響を議論することはできていない。そこで水理条件を変化させた多くの実験試行がし易い振動板水槽を使用した実験を行い、その結果の解析を Hull 大学のグループと行った。

## (3) イングランド北東部における過去の津波履歴の検討

Hull 大学の研究グループが実施する、イングランド北東部における過去の津波履歴とその水理条件の推定に協力した。英国ブリテン島の北部では過去に Storegga イベントと呼ばれる北海で発生した海底地すべりにともなう津波が来襲したと言われているが、その規模や同様の海底地すべり発生間隔など不明な点が多い。そこで Hull 大学の研究グループは、北海沿岸の洋上風力発電施設の災害リスク評価のため、イングランド北東部沿岸地域において過去の津波イベントによる堆積物を調査し、研究代表者はその検討に協力した。

## 3. 研究の方法

研究はそれぞれ以下の方法で行った。

## (1) 流れの非定常性を考慮した土砂輸送モデルの検証

検証に必要な実験データを得るため、筑波大学 CRiED 環境動態予測部門の複合流水路を使用して水路実験を行った（図1）。津波を模した非定常流段波を作用させ、砂床（粒径：0.20 mm）から輸送された堆積物を下流側でメッシュクロスにより採取した。流速はプロペラ式流速計を

用いて測定した値を用いた。実験では段波の規模と初期水深をパラメータとして変化させることで、それらの影響について調べた。採取された堆積物は乾燥重量を測定した。津波流による砂床の侵食と運搬過程の時系列については、高速度ビデオカメラ (IDT 社製 CCM3510) および一眼レフカメラによる動画で記録した。比較のための堆積物輸送モデルは、非定常流を反映できると考えられている Ribberink (1998)による流砂量式を用いた。また、津波流による堆積物運搬メカニズムについて、陸上河川や混濁流と比較するため、この実験で得られた津波流の時系列データと堆積物量について、Hull 大学の Fukuda 氏が提案したフローパワーと浮遊砂濃度の関係 (Fukuda et al., 2020, 2023) を調べた。

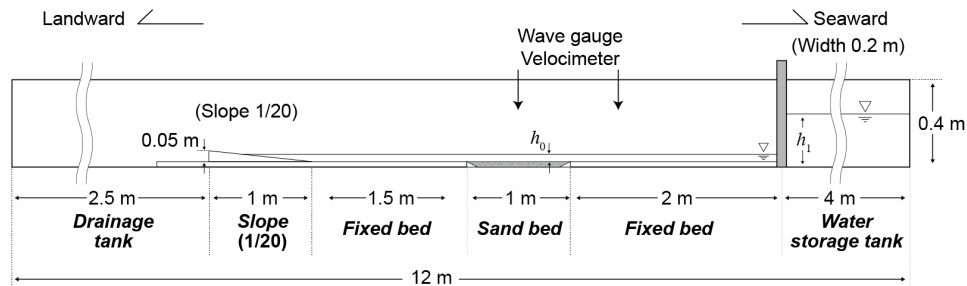


図 1. 水路実験の概略図

## (2) 非定常流下の底質輸送における泥質堆積物成分の影響

実験は筑波大学アイソトープ環境動態研究センターの振動板水槽を用いた。水槽内の振動板上に 500 mm 四方の初期平坦砂床を設け、振動板を振動させることで海底近傍を想定した振動流条件を与えた。振動板の振幅および振動周期を変化させることで、振動流の流速と周期の条件を設定した。砂床の中央には振動方向に直交した向きに伸びた三角柱の障害物を設置した。

実験では、豊浦標準砂 (中央粒径: 244  $\mu\text{m}$ ) のみの場合と、豊浦標準砂にシルト (中央粒径: 32  $\mu\text{m}$ ) を 10%と 50%混合した場合、豊浦標準砂にカオリン (中央粒径: 5  $\mu\text{m}$ ) を 10%混合した場合の計 4 種類の底質を用いて、振動板の振動速度と周期を組み合わせた様々な水理条件で底質の動きについて、ベッドフォームの発生を指標とすることで調べた。実験の条件の分析は、Hull 大学の Wu 博士らが砂泥混合物の水路実験の解析で使用し (Wu et al., 2024), 非定常流下での有効性が確認されている拡張限界シールズ数を用いた。

## (3) イングランド北東部における過去の津波履歴の検討

研究代表者は、同グループが実施しているイングランド北東部 Howick Burn および Hornsea における津波堆積物調査において、得られた堆積物とその解釈について検討を行った。得られた堆積物データについて主にオンラインで議論するとともに、同研究グループの Ben Pickett 氏の訪日時に仙台平野および石巻平野の調査に同行し、2011 年東北地方太平洋沖地震にともなう津波における地形の影響と、Storegga イベントによる津波の堆積物での同様の影響の可能性について議論を行った。

## 4. 研究成果

研究によりそれぞれ以下のような成果が得られた。

### (1) 流れの非定常性を考慮した土砂輸送モデルの検証

実験では、基研究課題において示唆されたものと同様に、砂床上の初期水深に依存した堆積物の巻き上げのタイミングの違いが観察された。一方で、実験で得られた実際の堆積物輸送量の総量と、堆積物輸送モデルの比較の結果、初期水深による明確な違いは見られなかった (図 2)。このことから、初期水深による堆積物巻き上げの遅れなどの影響は、堆積物輸送総量に必ずしも大きな影響を及ぼさないことが示唆された。また、フローパワーと浮遊砂濃度の関係について調べた結果、今回の条件下においては河川流で見られる線形関係の範囲に含まれる分布を示した。この結果は、1 回の津波流全体で見た場合の堆積物輸送においては、非定常性による影響は必ずしも小さくなく、準定常流である河川流と同等であることを示唆している。しかし今回の実験では、流速計の測定限界の問題からより大きい流速条件での高濃度輸送について調べることができなかったこと、堆積物輸送量の詳細な時系列を測定できず水理条件との関係を明らかにできなかったこと、粒径条件が限られていたためより細粒または粗粒な場合の影響について検討できなかったことなどの課題があり、今後解決に向けデザインされた水路実験が求められる。

### (2) 非定常流下の底質輸送における泥質堆積物成分の影響

実験の結果、標準砂のみを砂床とした場合に比べ、砂泥混合堆積物を砂床とした場合には底質

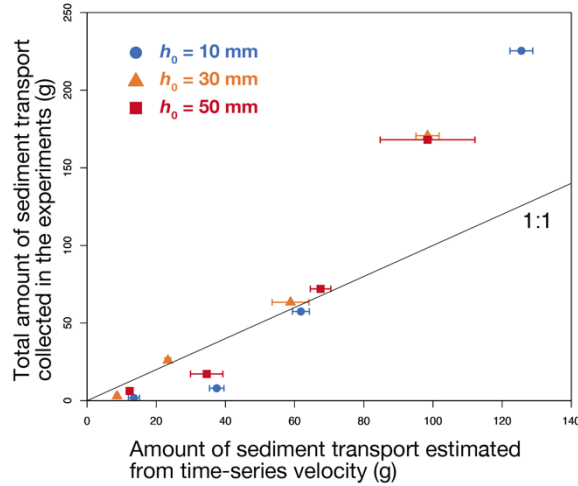


図 2. 流速条件から推算される堆積物輸送量 (横軸) と実際に採取された堆積物総量 (縦軸)

輸送が起こりにくく、リップル発生により大きな流速が必要となることが明らかになった (図 3). これは泥の混合がリップルの発生を妨げる働きをしていることを示唆している. 粘着性のカオリン 10%混合物の場合には、リップル発生に必要な流速がシールド数で 0.02 ほど大きくなる一方で、非粘着性のシルト 10%混合物の場合にはその影響は小さかった. 同じ 10%の砂泥混合堆積物においても、泥の特徴によってその影響が異なることが拡張限界シールド数を用いた解析で定量的に示された. また、シルト 50%混合物の場合にはカオリン 10%の場合と同程度の必要流速となる傾向がみられ、シルトが砂の空隙に入り込み構造を強固にする影響の可能性が示唆された. 一方で、振動周期の違いに代表される流れの非定常性に対して、底質による大きな違いは見られなかった. 今回の実験結果から、振動流のような非定常な流れの下での砂泥混合堆積物上における底質の輸送を考える際に、混合される泥の特徴や割合によってその影響が異なることが定量的に示唆された. この成果は 2024 年 4 月の日本堆積学会熊本大会において報告されたほか、現在国際学術誌に投稿中である.

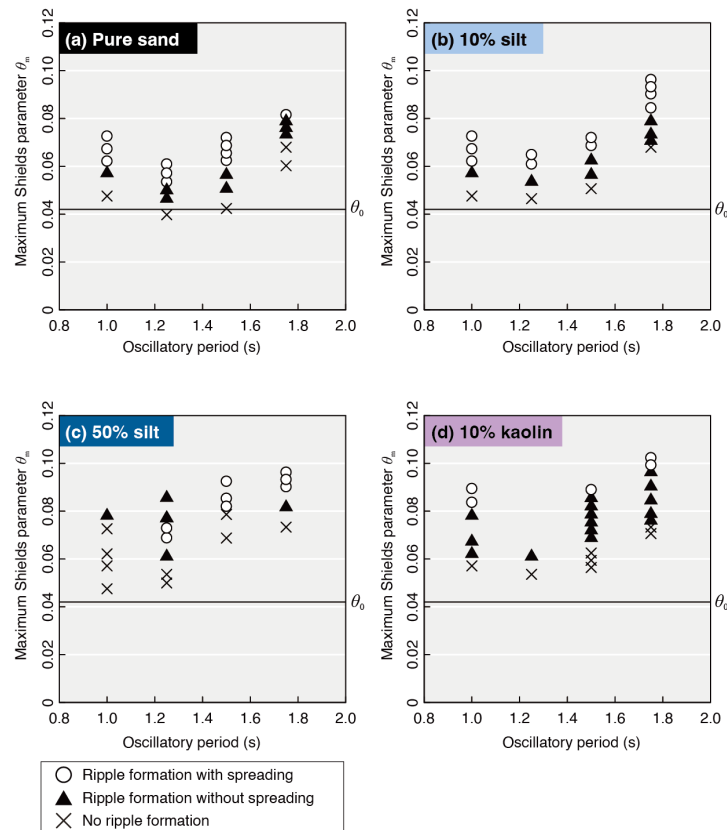


図 3. 振動周期と最大シールド数に対するリップル発生と伝播の有無. (a) 標準砂のみ, (b) 10%シルト混合物, (c) 50%シルト混合物, (d) 10%カオリン混合物.  $\theta_0$  は標準砂の限界シールド数 (= 0.042).

### (3) イングランド北東部における過去の津波履歴の検討

調査地域において予備調査によって得られた地下の柱状コアにおいて、津波イベントによる堆積物の可能性が示唆される粗粒堆積物層が見出された。2か所の調査地域で見出された粗粒堆積物層は粒径が異なっており、その起源だけでなく、日本の東北地方太平洋沿岸の津波堆積物と同様に周辺の地形の影響も示唆された。この成果は JpGU2023 において報告された (Pickett et al., 2023)。今後、周辺の地形を考慮しつつ掘削地点を増やし年代測定を行うことで、Storegga イベント津波による堆積物であるか慎重に検討する必要がある。その上でその層厚や粒径の空間分布から逆解析を行うことで、津波の水利条件の復元や波源の詳細な検討への貢献の可能性が  
ある。

#### <引用文献>

- Fukuda, S., Bastianon, E., McCaffrey, B., Yamaguchi, N., Naruse, H., Dorrell, R., 2020, 日本堆積学会 2020 年大会, O5.
- Fukuda, S. et al., 2023, *Nature Communications*, 14:2288. DOI: 10.1038/s41467-023-37724-1
- Pickett, B., Dorrell, R.M., Dean, J., Naruse, H., Yamaguchi, N. and Parsons, D.R., 2023, *Japan Geoscience Union Meeting 2023*, HDS06-P04.
- Ribberink, J.S., 1998, *Coastal Engineering*, 34, 59–82.
- Shinozaki, T., Yamaguchi, N. and Sekiguchi, T., 2020, *Sedimentary Geology*, 407, 105750.
- Wu, X. et al., 2018, *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 123. DOI: 10.1029/2018JF004681
- Wu, X. et al., 2022, *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 127. DOI: 10.1029/2022JF006771
- Wu, X. et al., 2024, *Earth Surface Dynamics*, 12, 231–247.
- Yamaguchi, N. and Sekiguchi, T., 2015, *Sedimentary Geology*, 328, 115–121.
- Yamaguchi, N. and Sekiguchi, T., 2018, *Journal of Sedimentary Research*, 88, 467–474.
- 山口直文, 2019, 地質学雑誌, 125, 121–136.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 福田壮二郎・Elena Bastianon・Bill McCaffrey・山口直文・成瀬 元・Robert Dorrell
2. 発表標題 実験データから明らかになった混濁流と開水路における浮遊砂濃度と乱流構造の違い
3. 学会等名 日本堆積学会2020年オンライン大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Ben Pickett, Robert M. Dorrell, Jonathan Dean, Hajime Naruse, Naofumi Yamaguchi, Daniel R Parsons
2. 発表標題 Storegga deposits at Howick Burn and their application to Low Frequency, High Magnitude risk assessment of Offshore Wind
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
	パーソンズ ダニエル  (Parsons Daniel)	ハル大学・エネルギー環境研究所・教授	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
	ドレル ロバート  (Dorrell Robert)	ハル大学・エネルギー環境研究所・教授	
	ウ シュシュ  (Wu Xuxu)	ハル大学・エネルギー環境研究所・研究員	
	福田 壮二郎  (Fukuda Sojiro)	ハル大学・エネルギー環境研究所・博士課程	
	関口 智寛  (Sekiguchi Tomohiro)	筑波大学・アイソトープ環境動態研究センター・講師  (12102)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
英国	University of Hull			